第2章

プリント基板開発を体験する

——2005年1月号付属FPGA基板をリバース・エンジニアリング

城野幸男

ボード設計に携わる新人技術者に割り当てられるしごとの一つとして，過去に先輩技術者が開発したボードの設計情報を利用して，派生製品のためのボードを作るといった作業がある．ここではこうしたリバース・エンジニアリングの事例を紹介する．本誌2005年1月号に付属したFPGA基板のデータを復元したり，改変したりする．なお，本稿で作成した設計データは，すべて本誌付属のCD-ROMに収録されている．（編集部）

ここではプリント基板の開発事例として，リバース・エンジニアリングの実例を紹介します．すでにでき上がっている基板の製造データを使って，元の設計データを復元します．そして，これを再利用するための方法について説明します．合わせて，リバース・エンジニアリングの意味についても考えてみます．サンプルとして，本誌2005年1月号に付属していたFPGA基板を取り上げました．リバース・エンジニアリングの手順を理解していただくと同時に，このFPGA基板の応用の一つとして役立てていただきたいと思います．

1 リバース・エンジニアリングとは

普通のもの作りでは，設計情報を加工手段に置き換え，それを用いて製造するという手順でしごとを進めます．例えばプラスチック成型品を製造する場合，その製品の設計図面から金型を起こし，この金型を使ってプラスチックの成型を行います．

一方，この逆を行うのが，「リバース・エンジニアリング」です．製品や加工手段から設計情報を抽出します．すなわち，でき上がったプラスチック製品を採寸して，その金型を設計したり，製品や金型の採寸から製品の設計図を作ったりすることが，リバース・エンジニアリングの手順です（図1）．

● 模倣 vs. リバース・エンジニアリング

リバース・エンジニアリングは，解析によってその技術を吸収すること，そして独自性を加えてその技術を再利用することを目的として行うものです．例えば，競合する他

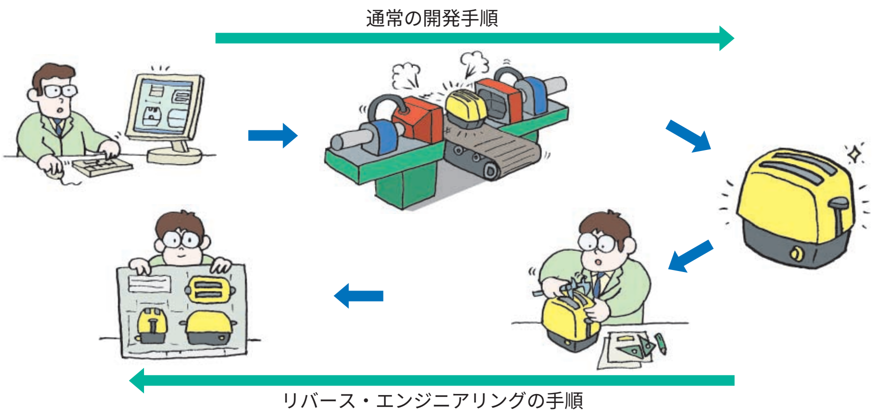
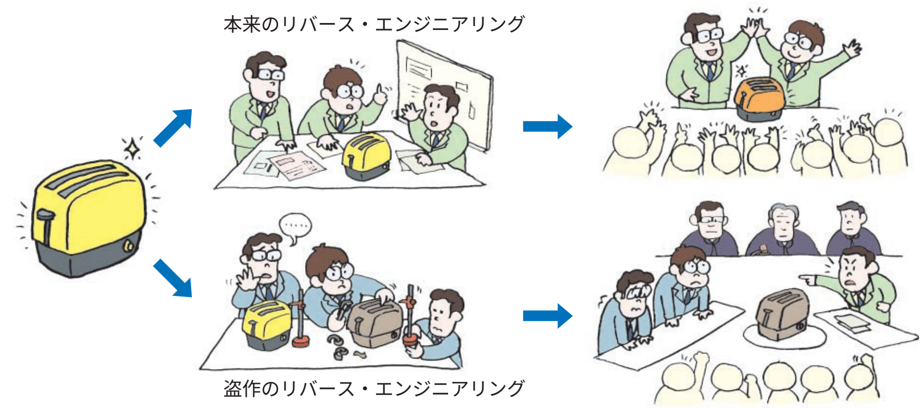


図1
リバース・エンジニアリングは工程を逆行する
リバース・エンジニアリングでは，普通のもの作りと逆の工程になる．例えば，でき上がったプラスチック製品を採寸してその金型を設計したり，製品や金型の採寸から製品の設計図を作ったりする．

図2
リバース・エンジニアリングでは，新たな価値を創造することが重要
単なる模倣だけを目的とした商品の解体調査は，正当なリバース・エンジニアリングとは言えない．リバース・エンジニアリングが妥当な行為として認知され，盛んに行われるようになったのは，その成果が社会に還元されるからである．



社の新製品を模倣すれば，手っ取り早く対抗商品を作ることができます．しかし，単なる模倣だけを目的とした商品の解体調査は，正当なリバース・エンジニアリングではなく，盗作の技術です．リバース・エンジニアリングが妥当な行為として認知され，盛んに行われるようになったのは，その成果が社会に還元されるからです．すなわち，蓄積された知的資産は利己的に再利用するだけではなく，新たな価値の創造や課題の解決によって社会に貢献しなくてはなりません．

余談になりますが，筆者が以前，OEM（original equipment manufacturing）受託生産のための設計を担当していたときの話です．OEM提携先へのデモンストレーションのために，入手したサンプルを解体調査してデッド・コピーしたことがあります．回路図も描かず現物だけを見てまったく同じものを作りました．そのときこれを見た同僚が，「それは“技術”ではなく“奇術”だね」と言ったのを覚えています．今思うとまさにそのとおりです．もしこのときにリバース・エンジニアリングの意味を理解していれば，会社の業績が伸び，筆者も回路設計業務を続けていたかもしれません（図2）．

● さまざまな目的で行われるリバース・エンジニアリング

リバース・エンジニアリングの目的とその例を挙げてみます．

1）開発の効率化

リバース・エンジニアリングは，他社の製品を解体調査することにより，競争力のある商品を効率良く開発するという目的で行われます．半導体の業界などで活発に行われ，リバース・エンジニアリングを専門に請け負う企業もあるようです．

2）互換製品の開発

リバース・エンジニアリングは，互換性を実現するための解析に用いられます．話は少し古くなりますが，セイコーエプソンがNECのパソコン「PC-9800シリーズ」をリバース・エンジニアリングして互換製品を開発した例はこの典型です．現在のWindowsパソコンのルーツであるIBM-XT/ATでも多くの互換機が開発されました．しかし，この場合，BIOS（basic input/output system）のソース・コードを含むシステム全体の仕様が公開されていたので，包括的なリバース・エンジニアリングは必要なかったと思います．互換製品を開発するためのリバース・エンジニアリングは，ハードウェアとソフトウェアの双方において行われています．

3）システムやソフトウェアの保守

ソフトウェアを含むシステムでは，プログラムのソース・コードがないとトラブルの原因究明が困難です．これが手に入らない場合，逆コンパイルによるソースの抽出が必要になります．とくに，ソフトウェアがハードウェアを直接制御している箇所については，リバース・エンジニアリングは不可欠な手段です．筆者も以前，ROMからバイナリをダンプして，逆アセンブルした記憶があります．外部に発注して開発したカスタム・ソフトウェアの保守や，パッケージとして流通しているソフトウェアのセキュリティ対策を行う場合などにもリバース・エンジニアリングが用いられます．

4）既存資産の再利用

図面やオリジナル・データが存在しない古い資産を再利用する場合にも，リバース・エンジニアリングの手法が用いられます．CAD（computer aided design）データのないプリント基板（PCB：print circuit board）を設計変更した

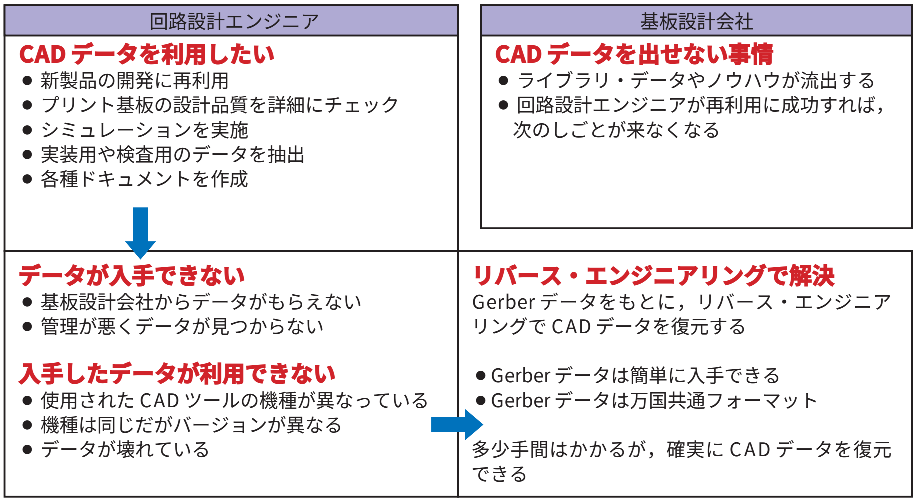


図3
プリント基板の分野でも必要なリバース・エンジニアリング
CADツールの多様化により，データの互換性が取りにくくなってきている．また，情報保全の施策により，必要なデータを入手できない場合がある．このようなとき，リバース・エンジニアリングによる基板データ（PCBデータ）の復元が必要になる．

い場合があります．このような場合，Gerber データ[注1]を使ってCADデータを復元します．また，分野はまったく異なりますが，文化遺産を修復するときにも3D（3次元）スキャナで現物を測定し，CADデータを生成するという作業が行われるのだそうです．

5）知的所有権の保護

他社が知的所有権を侵害していないかどうかを調査する目的で，他社製品のリバース・エンジニアリングが行われることがあります．

● プリント基板でも必要なリバース・エンジニアリング

リバース・エンジニアリングということばから模倣を連想し，後ろめたさを感じる人も多いかと思います．しかし，現実には妥当な行為として定着し，多くの分野でリバース・エンジニアリングが行われるようになりました．一方，その弊害として，「所有権が明確に主張されている部分以外の模倣は許される」という利己的な考えかたが生まれてきたように思います．これに対して開発者は，他人に利用されたくない範囲を明確に主張する必要があります．また，リバース・エンジニアリングを行う際には他人の利益を損なうことがないように，細心の注意を払う必要があります．

基板設計の分野においてもリバース・エンジニアリングが必要な場合があります．CADツールはすでに基板設計の必需品として定着しており，データの共有と再利用が設計の効率化に役立っています．しかしその一方で，CADツールの多様化により，データの互換性が取りにくくなってきています．また，情報保全の施策により，必要なデータを入手できない場合があり，これらが設計の効率を低下させています．例えば，CADツールが異なるとデータに互換性がありません．そのため，外部で設計した基板を社内で設計変更するときなど，基板のCADデータが手に入っても利用できないケースがあります．このような場合，リバース・エンジニアリングによる基板データ（PCBデータ）の復元が必要になります（図3）．

● リバース・エンジニアリングは手順が通常と逆

通常の手順（フォワード・エンジニアリング）で基板を起こす場合，まず回路図を作成します．そしてこの後，回路図からネットリスト[注2]を出力し，プリント基板のレイアウト・エディタに読み込みます．レイアウト・エディタでは制約条件に基づいて部品の配置と配線を行います．そして，しあげとチェックを行ったあと，レイアウト・エディタからGerberデータとNC（numerical control）データ[注3]を出力します．さらにこの後，GerberデータとNCデータをGerberエディタ[注4]に読み込み，データが正しく生成され

注1：基板のアートワーク・データ．米国Gerber社の社内規格がEIA RS-274-Dとして規格化されたもの．これを拡張したRS-274-Xとともに業界標準として用いられている．RS-274-Dは「標準Gerber」，RS-274-Xは「拡張Gerber」と呼ばれている．
注2：回路の結線情報．部品間の接続をテキストで記述して回路を表現したもの．基板設計の場合には回路図から生成する．部品の定義と接続の定義が含まれている．回路図エディタとレイアウト・エディタ（PCBエディタ）の間の設計データの受け渡しに使用する．
注3：基板の穴と外形加工用のデータ．設計時には穴加工データだけを作成し，外形加工用データは基板メーカが作成する場合が多い．NCデータを穴加工データだけの意味に用い，外形加工用データをルータ・データと呼ぶこともある．
注4：プリント基板のレイアウト・エディタから出力されたGerberデータとNCデータの編集を行うツール．プリント基板設計者は，おもにGerberデータとNCデータが正しく生成されたかどうかの確認に使用する．プリント基板メーカでは面付けや製造に必要なデータの挿入，および基板の検査治具用のデータ作成などに使用する．

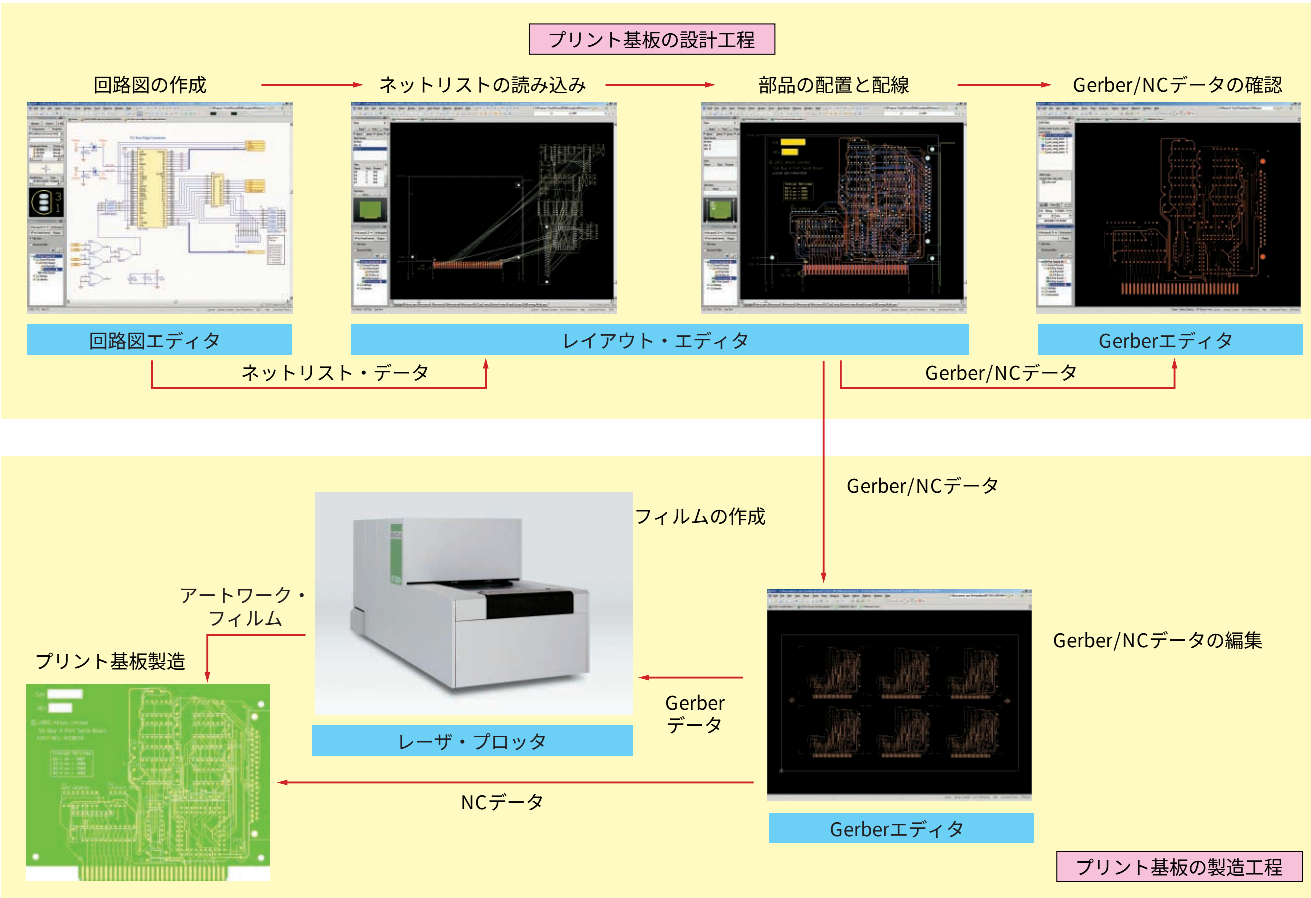


図4　プリント基板設計・製造工程の概要

プリント基板設計は，回路図から出力されたネットリストをもとに作業を行う．プリント基板メーカにはGerberデータとNCデータが引き渡される．プリント基板メーカは，このGerberデータとNCデータをもとにして作業を進める．

たかどうかをチェックします．通常はここまでが設計者のしごとで，後は基板メーカのしごとです．

基板メーカでは，GerberデータとNCデータをGerberエディタに読み込み，基板を効率的に製造できるように編集します．ここで行われる編集作業には面付け[注5]，ガイド・マークやテスト・クーポン[注6]の追加などがあります．この後，レーザ・プロッタにGerberデータを出力して，製造用フィルムを作成します．そして，このフィルムとNCデータを使って基板を製造します．

一方，リバース・エンジニアリングではこの逆の手順を用います．すなわち設計が終わった後で出力されるGerberデータとNCデータを最初の入力データとして使用し，このデータから基板データを復元します（図4）．

注5：基板データを何枚も貼り合わせること．小型の基板を1枚ずつ加工すると手間がかかる．このため，データを複数並べてサイズを大きくし，一度に多くの基板を加工する．通常は同じ基板を面付けするが，異なる基板を混在させる場合もある．

注6：基板メーカが使用する補助データ．面付け後のアートワーク上に，規定のパターンを挿入する．ガイド・マークは，多層基板の貼り合わせに必要なガイド・ピンの位置を示す．テスト・クーポンは，スケーリング（基板の収縮補正）や特性インピーダンスの測定に使用する．

2 PCBデータを取り戻す

ここではリバース・エンジニアリングによって基板データを復元する作業について説明します．

● プリント基板設計ツールとしてProtelを使用

ここでは基板データの復元作業に，オーストラリアAltium社のプリント基板設計ツール「Protel 2004」を使用します（同社の「DXP 2004」に含まれている）．このツールには，回路図エディタとレイアウト・エディタを中心に，データの検証に必要な各種シミュレータやGerberエディタなどが統合されています．読み込み可能なデータ・フォーマットの種類が豊富なため，リバース・エンジニアリング

の作業に向いていると思います．

筆者は手持ちのProtel 2004製品版を使用しましたが，無償で配布されているトライアル・バージョンでもまったく同じことができます（ただし，30日間のみ）．トライアル・バージョンの評価用ライセンスは，開発元の日本法人であるアルティウムジャパンに申し込むことによって入手できます．

● 本誌付属FPGA基板のCADデータを復元

基板データの復元の対象として，本誌2005年1月号に付属していたFPGA基板を取り上げます．このFPGA基板を構成する以下のデータを入手することができました．さらに同号に付属していた基板の現物が手元にあります（写真1）．これらを使って，FPGA基板のオリジナル・データを復元します．

- 製造データの仕様書
- Gerber（アートワーク）データ── 基板外形，部品面パターン，はんだ面パターン，部品面シルク，部品面レジスト，はんだ面レジスト
- NC（穴あけ）データ
- 回路図（PDFフォーマット）
- ネットリスト── PADSフォーマット，Protelフォーマット
- そのほか ── 基板のCADデータ（PADS V5バイナリ・フォーマット，PADS V5 Basic Unit ASCIIフォーマット），基板のチェック・プロット（PDFフォーマット）

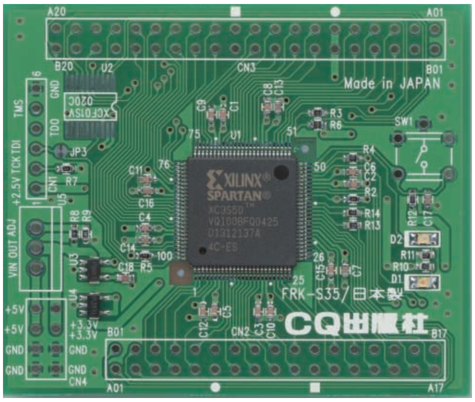


写真1　本誌2005年1月号の付属FPGA基板

● 回路図データを復元した後で基板データを復元

このように今回は多くのデータを入手できました．回路図も基板データも含まれています．しかし，PDFフォーマットの回路図には絵がら情報だけしか入っていないので，CADデータとしては使用できません．また，基板データはProtel 2004と互換性のないリビジョンなので使用できません．要するに基板だけでなく肝心の回路図のCADデータもないので，この両方を復元しなくてはなりません．そこで，これらを次のような方法で復元します．

1）回路図データの復元

回路図エディタにPDFデータを読み込むことはできません．DXFフォーマットに変換して読み込めた場合でも，接続情報を持たない単なる絵がらが再現されるだけです．このため，回路図については再利用をあきらめ，最初から描き直すことにします．

2）基板データの復元

製造用のGerberデータとNCデータだけを使って基板データを復元します．これなら社内のすべてのデータが消失した場合でも，基板メーカからデータを取り寄せることにより，基板データを復元することができます．また，受け取った基板データはバージョン変換（PADS ASCII V5からV3.5へ）すればツールに読み込めると思われますが，外部に依頼しないと変換できないのであきらめました．

基板データの復元は次の手順で行います．

- GerberエディタにGerberデータとNCデータを読み込む．
- Gerberエディタで，GerberデータとNCデータを一つのデータに合成する．
- フットプリント注7名を回路図シンボルに割り付ける．
- Gerberエディタからプリント基板のレイアウト・エディタにデータを送り込む．
- フットプリントを作成する．
- レイアウト・エディタで，両面配線の層間の接続に使用されているフリー・パッドをビア注8に置き換える．
- 回路図から部品とネット情報を読み込む．
- レイアウト・エディタでフリー・オブジェクト注9を部品

2

注7：プリント基板のレイアウト・エディタで使用する部品．基板上に実装する部品の端子とぴったり一致するようにパッドが配列されている．部品形状を示す絵がらが描かれている．
注8：複数の層で構成された配線パターンを相互に回路接続するための円形のシンボル．中央に穴があり，内側に施されたメッキによって導通する．部品の端子部分でも層間の回路が接続されるが，それ以外の部分はこのビアを使って接続する．
注9：部品とその属性に含まれていない基板上のオブジェクト．手作業で配置したシルク文字（フリー・テキスト）や取り付け穴（フリー・パッド）などがある．部品番号は部品属性に含まれているため，フリー・オブジェクトではない．ネット属性を持たない配線パターンもフリー・オブジェクトと呼ばれる．

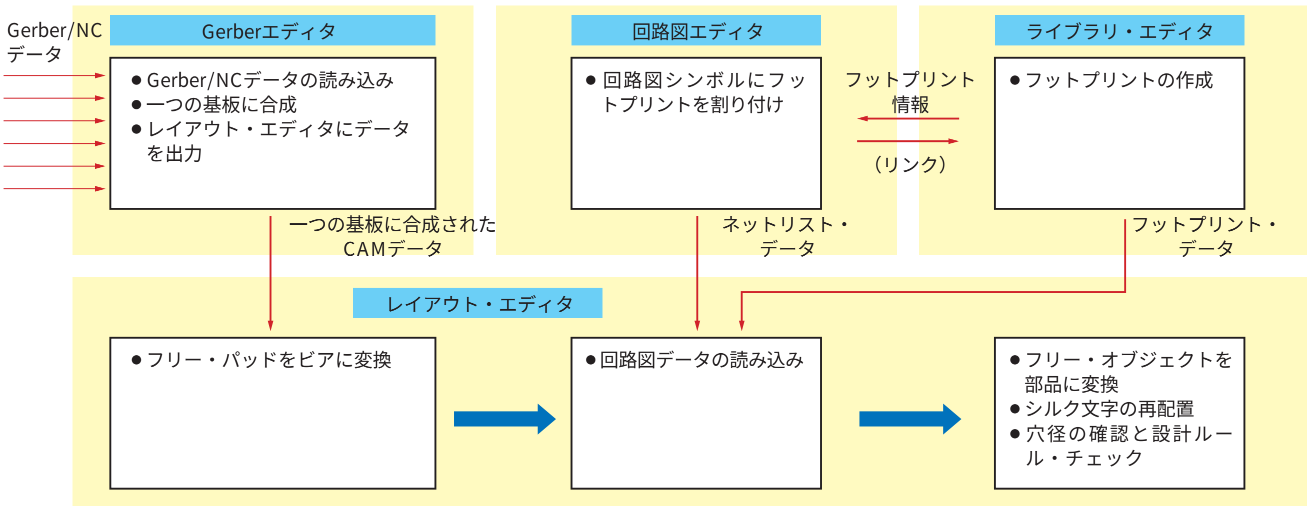


図5　基板データの復元工程

Gerberデータと NC データをもとに基板データを復元する．回路図からネットリストを読み込み，回路図と整合性のある完全なプリント基板の CAD データに変換する．

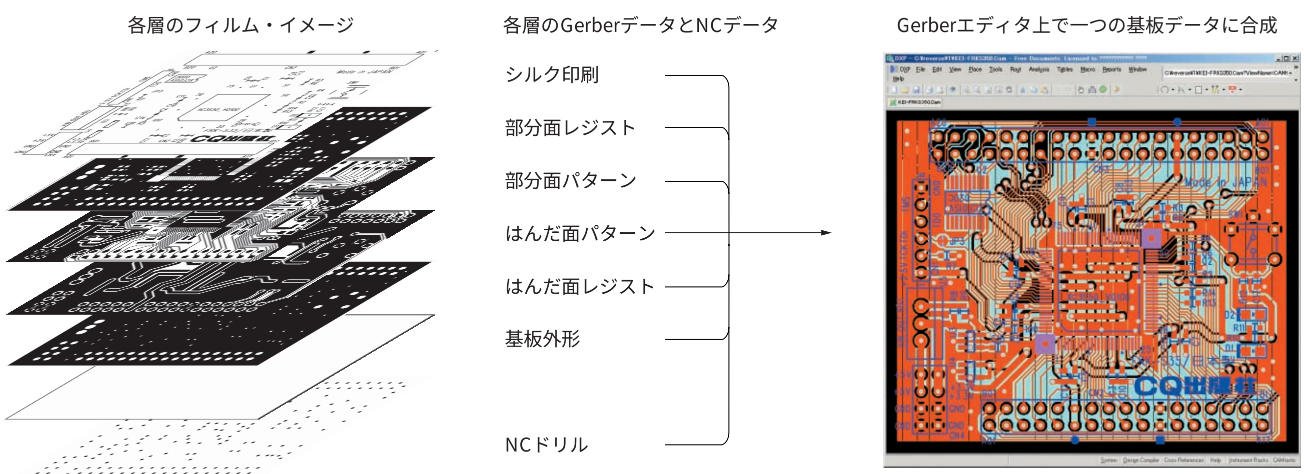


図6　Gerber データと NC データを読み込んで基板データに変換

Gerber エディタに各層の Gerber データと NC データを読み込んで，一つの基板データに変換する．基板の構造を反映した層間の関連付けを行う．しかし，部品を構成する各パッドがフリー・パッドに変換されるため，回路図と一致しない．

に置き換える．

●レイアウト・エディタ上でシルク文字の再配置を行う．

●穴径の確認と設計ルールのチェックを行う．

この一連の作業により，Gerber データと NC データから完全な基板データを復元することができます．配線パターンとビアがそのまま使えるので，配線を引き直す必要はありません．基板設計では時間の60%を配線に費すと言われているので，かなりの手間が省けるはずです（図5）．

注10：Gerber データと NC データ，およびそのほかの基板加工用データ．検査用や部品実装用のデータもこの分類に含まれる．CAM はコンピュータ支援のよる製造を意味する“ computer aided manufacturing ”の略．

● Gerber と NC を読み込んで基板データに変換

まず，Gerber データと NC データを Gerber エディタに読み込みます．リバース・エンジニアリングでは，工程を逆行します．このため，通常は設計の結果として出力する Gerber データと NC データを最初の入力データとして使用します．読み込んだこれらのデータを，一つの基板データに合成します．ここで合成される基板データは，部品データを持たない疑似的なものです．このため，ここではこれ

COLUMN 標準Gerberと拡張Gerber

Gerberは，プリント基板のアートワーク・フィルムの作画に用いられるグラフィックス・フォーマットです．もともとはフィルム作画機(フォトプロッタ)のメーカである米国Gerber社(現Barco Gerber Systems社)で開発され，社内規格として使用されていたものです．これがデファクト・スタンダードとして広く普及したため，1979年にEIA(米国電子工業会)がRS-274-Dとして規格化しました．現在，量産用のプリント基板フィルムの作成にはかならずといってよいほど，このGerberフォーマットが用いられています．

このRS-274-Dフォーマットは，アートワークを「点」と「線」の組み合わせだけで表現します．RS-274-D Gerberデータには作画するすべての「点」と「線」の座標が示されています．しかし，この「点」と「線」のサイズの情報は含まれておらず，その代わりにDコードと呼ばれる作画ツールの番号が示されています．このため，実際に作画する場合には，このDコードに作画ツールの形状とサイズを与える必要があります．

初期のフォトプロッタでは，アパーチャと呼ばれるシャッタで光束を制御して，作画の形状とサイズを決定していました．このため，作画ツールをアパーチャと呼び，そのサイズを示すリストをアパーチャ・テーブルと呼んでいます．このしくみはペン・プロッタに置き換えて考えるとわかりやすいと思います．アパーチャはプロッタのペンに相当し，そのペン先の形状と太さがアパーチャ・テーブルに示されます．

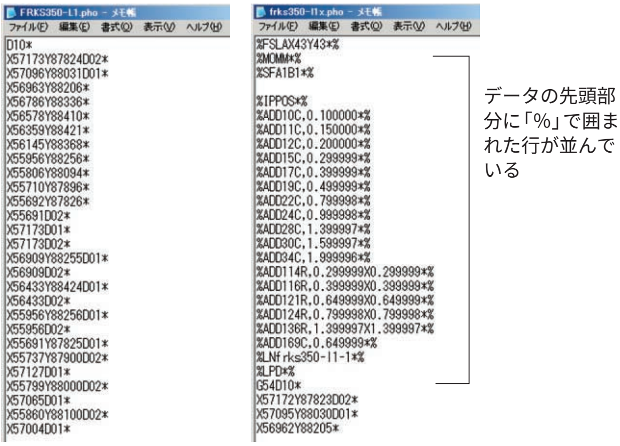
RS-274-Dで作画する場合，Gerberデータだけでなく，かならずこのアパーチャ・テーブルが必要になります．また，RS-274-Dには面を表現する手段がありません．このため，ベタ・パターンのように広く塗りつぶす部分には，多くの「線」を並べなくてはなりません．このため，パターンが単純でも塗りつぶしがあるとデータ量が膨大になる場合があります．

このように，RS-274-Dにはいくつか不便な部分があるため，その改良版として，RS-274-Xフォーマットが開発されました．これには，アパーチャ・サイズの記述が含まれており，別個にアパーチャ・テーブルを用意する必要はありません．また，「点」と「線」だけではなく「面」の記述が可能なので，データ量が少なくてすみます．

このRS-274-XはEIA規格ではなくGerber社の社内規格です．しかし，データの受け渡しが簡単になることから，現在ではRS-274-DよりもRS-274-Xのほうが多く使われているようです．RS-274-XはRS-274-Dの上位互換であり，両方ともGerberフォーマットです．しかし，ファイルをやり取りするときには混同を避けるために，RS-274-Dを「標準Gerber」，RS-274-Xを「拡張Gerber」と区別して呼んでいます．

Gerberファイルを受け取ったときは，まず，Gerberの種類を見分ける必要があります．別個にアパーチャ・ファイルが用意されていなければ，それは拡張Gerberのはずです．しかし手違いが起こることもありえるので，一度ファイルの中身をのぞいてみるとよいでしょう．通常はASCIIファイルなので，テキスト・エディタで読むことができます．拡張Gerberの場合は，先頭付近に「%」で区切られたパラメータが何行か並んでいるはずです．これは，拡張Gerber固有のもので，標準Gerberにはありません．もしこれがなければ標準Gerberなので，別にアパーチャ・ファイルが必要になります(**図A-1**)．

拡張Gerberでデータをやり取りする場合は，ここまでの知識で十分です．標準Gerberを使う場合には，もう少し詳しく知る必要があります．また，トラブルの解決にはさらに多くの知識が必要になります．以下の参考文献(1)～(3)のWebサイトでフォーマットが詳細に解説されているので，一度ご覧になることをお勧めします．



(a) RS-274-D (標準Gerber)　(b) RS-274-X (拡張Gerber)

図A-1 Gerberの種類を見分ける
データの先頭部分に「%」で囲まれた行があれば拡張Gerber，なければ標準Gerber．

参考・引用*文献

(1) 長野県情報技術試験場，技術の広場 ガーバーフォーマット[解説]，http://www.nagano-it.go.jp/jyouhou/technology/gbf_s.pdf.
(2) 長野県情報技術試験場，拡張ガーバーフォーマット解説，http://www.nagano-it.go.jp/jyouhou/technology/ext_gerber.pdf.
(3) Barco Gerber Systems社，Engineering Services Department, "RS-274X Format User's Guide", Part Number 414-100-014 Rev C, Sept. 21, 1998, http://ohm.bu.edu/~hazen/my_d0/std/rs274xc.pdf.

をCAM(computer aided manufacturing)レベルの基板データ[注10]と呼ぶことにします(図6)．

1) 入手したファイルの種類を確認する

まず，作業に必要なすべてのGerberデータ，およびNCデータがそろっていることを確認します．さらに，そのフ

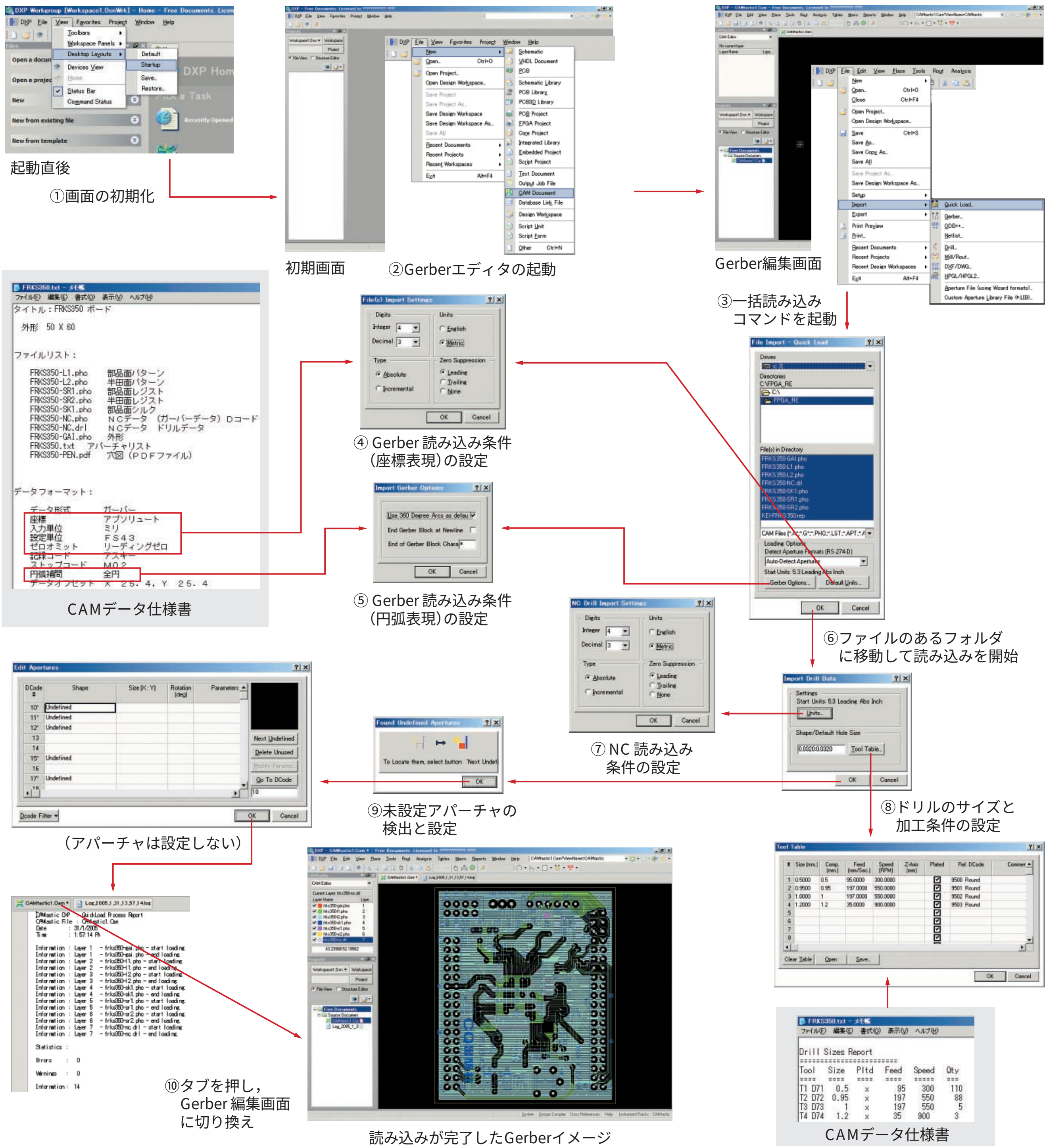


図7 GerberデータとNCデータの読み込み

まず，デスクトップ上のDXP 2004アイコンをダブルクリックし，CADツールを起動する．起動後，「View」→「Desktop Layout」→「Startup」を選び，画面を初期化する（①）．次に，「File」→「New」→「CAM Document」を選ぶ．これによりGerberエディタが立ち上がり，Gerber編集画面が表示される（②）．この画面から，「File」→「Import」→「Quick Load」を選択する（③）．この後，File Import - Quick Loadダイアログが表示されるので，この下部にある[Default Units]ボタンを選択し，CAMデータの仕様書のとおりに設定する（④）．続いて，この左にある[Gerber Options]ボタンを押し，「Use 360 Degree Arcs as defaults」の項目にチェックを入れる（⑤）．この後，File Import - Quick Load画面に戻り，DrivesウィンドウとDirectoriesウィンドウを使ってC:\FPGA_REに移動する（⑥）．この操作によってFile（s）in Directoryウィンドウに，C:\FPGA_REフォルダ内のファイル・リストが表示される．これを確認した後，[OK]ボタンを選択する．この操作によって読み込みが開始され，直後にImport Drill Dataダイアログが表示される．この[Units]ボタンを押して読み込み条件を設定する（⑦）．さらに，[Tool Table]ボタンを押して，NCドリルのサイズと加工条件（ドリルの回転数と送り速度）を設定する（⑧）．設定値はCAMデータの仕様書に従う．この設定が終わった後，Import Drill Dataダイアログの[OK]ボタンを押す．その後，Found Undefined Aperturesウィンドウが表示されるので，[OK]ボタンを選ぶ（⑨）．さらにこの後，Edit Aperturesダイアログが表示されるので，何も入力せず[OK]ボタンを押す．この後すぐに読み込みが完了し，画面にログが表示される．このログ上部のタブを選んで画面を編集画面に切り替えると，Gerberイメージが表示される（⑩）．

ォーマットの仕様書の有無を確認します．仕様書は条件の設定に使用します．

データが標準Gerber（RS-274-D）で作成されている場合，アパーチャ・リストが独立したファイル，または製造データの仕様書の中に示されている必要があります．拡張Gerber（RS-274-X）の場合にはアパーチャ・リストは不要です（p.45のコラム「標準Gerberと拡張Gerber」を参照）．今回は，作業に必要なこれらのファイルがすべてそろっています．また，入手した仕様書の中にアパーチャ・リストが示されていることから，Gerberデータのフォーマットが標準Gerberであることがわかります．作業を行いやすくするため，フォルダ（例えば，C:\FPGA_RE）を作り，これらのファイルをすべて格納します．

作業に必要なファイルは以下のとおりです．

- CAMファイルの読み込み条件の設定に使用するCAMファイルの仕様説明 ── FRKS350.txt
- Gerberイメージの確認に使用するチェック・プロット ── CQ-FRKS350-REV2-PEN.pdf
- 基板の構成素材として使用するGerberデータ ── FRKS350-GAI.pho（基板外形），FRKS350-L1.pho（部品面パターン），FRKS350-L2.pho（はんだ面パターン），FRKS350-SK1.pho（部品面シルク），FRKS350-SR1.

2

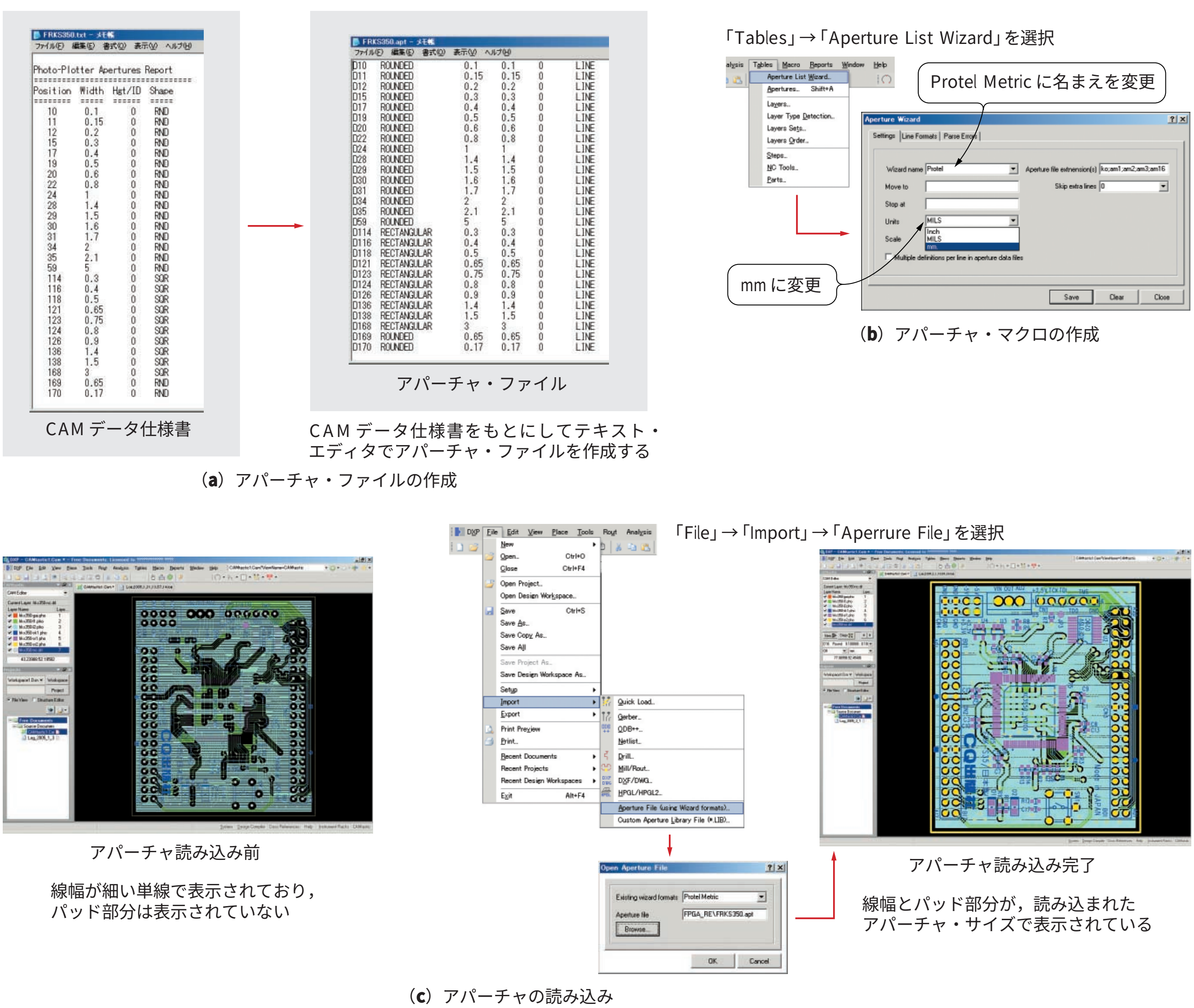


図8　アパーチャ・テーブルの読み込み

アパーチャ・ファイルの作成では，（a）のようにCAMデータ仕様書のアパーチャ指示をProtelフォーマットの形式に変更してファイルに保存する．ここではファイル名をFRKS350.aptとした．アパーチャ・マクロの作成では，（b）のようにProtelのアパーチャ読み込みマクロの単位をmmに変更して，Protel Metricの名まえで保存する．アパーチャの読み込みでは，（c）のようにExisting wizard formatsを「Protel Metric」に，Apature fileを「FRKS350.apt」に設定する．

pho（部品面レジスト），FRKS350-SR2.pho（はんだ面レジスト）

- 基板の構成素材として使用するNCデータ――FRKS350-NC.drl（Excellonフォーマットの穴加工データ）

2）GerberデータとNCデータを読み込む

まず，GerberエディタにGerberデータとNCデータを読み込みます．Gerberデータは基板のアートワーク・イメージを再現し，NCデータはその穴情報を示します．この2種類のデータによって，基板全体の構造を再現することができます．誤りなく読み込めたら，これを基板データ復元のための元データとして使用します．この作業は慣れない人にはかなり煩雑です．手順は次のとおりです（図7）．

- CADツールを起動する
- Gerberエディタの新規作成画面を開く
- GerberデータとNCデータを読み込む

ここまでの作業で，基板を構成する六つのGerberデータとNCデータが表示されます．しかし，パッド部分は表示されておらず，配線パターンは細い単線で表示されているはずです．これは，Gerberに線幅データが含まれていないからです．同じようにNCデータにも穴径データが含まれていません．このため，次の手順によって線幅と穴径を与えます（図8）．

- アパーチャ・ファイルを作成する
- アパーチャ・マクロを作成する
- アパーチャ・ファイルを読み込む

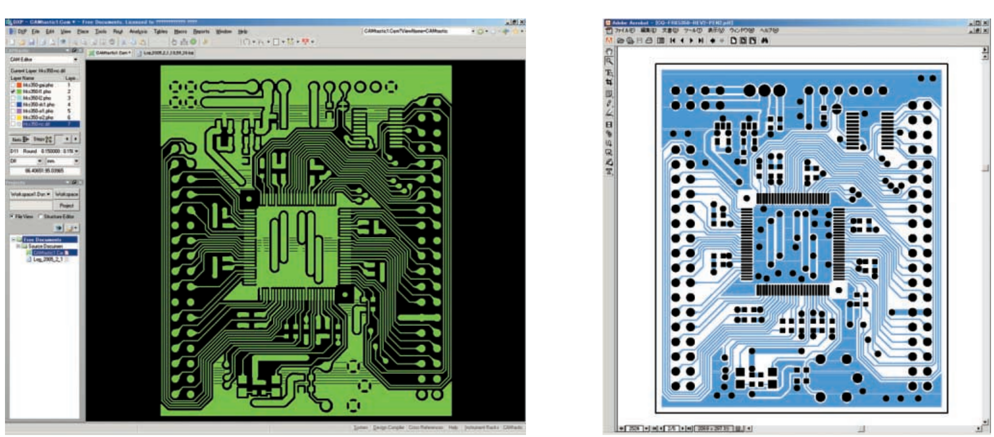
アパーチャ・テーブルにはGerberデータが作画に使用するツールの形状とサイズが示されます．Gerberデータがこのテーブルを参照することにより，正しい線幅でアートワーク・イメージを再現します．アパーチャ・サイズは，ダイアログ・ボックスを使って個々に設定することもできますが，手間がかかるためファイルを用意して一括設定しました．このGerberエディタでは，複数のフォーマットのアパーチャ・ファイルを読み込むことができます．今回はProtelフォーマットを使いました．アパーチャ・サイズをmm（ミリ・メートル）で記入したので，Protel - mmフォーマットの読み込みマクロを作成しました．このアパーチャ・ファイルの読み込みが終わると，パッドと配線パターンが正しいサイズで表示されます．

これらの一連の作業で，GerberデータとNCデータが正しく再現されるはずです．この後，チェック・プロット（CQ-FRKS350-REV2-PEN.pdf）を開いて双方を見比べます．双方に違いがなければGerberデータが正しく読み込めたことになります（図9）．

3）GerberデータをCAMレベルの基板データに合成

Gerberエディタ上へのデータの読み込みが完了したあと，読み込んだそれぞれの層のデータを連結し，一つの基板データに変換します．各層の関連の検出には，穴あけのためのNCデータが使用されます．例えば，ランドが重なった部分に穴があると，その部分が接続部とみなされ，フリー・パッドと呼ばれる一つの部品に変換されます．この変換は次のような手順で行います．

まず，読み込んだそれぞれのGerberデータに，基板の層を割り付けます．例えば，FRKS350-L1.phoは部品面パターンなので「Top」に，FRKS350-L2.phoははんだ面パターンなので「Bottom」に割り付けます．さらにNCデータFRKS350-NC.drlについても「Drill Top」に設定します．回



（a）Gerberエディタで再現されたアートワーク　（b）PDFで受け取ったチェック・プロット

図9
チェック・プロットとの比較
GerberデータとNCデータの読み込みが終わった後，チェック・プロットと見比べて，違いがないかどうかを調べる．このチェックはそれぞれの層を一つずつ表示させて行う．違いがなければ，正しく読み込めたことになる．

路の接続に関与する層はこの三つです．この三つの設定だけでも基板データへの変換が可能ですが，基板の構造を正しく再現するためにほかの層についても割り付けを行います（図10）．

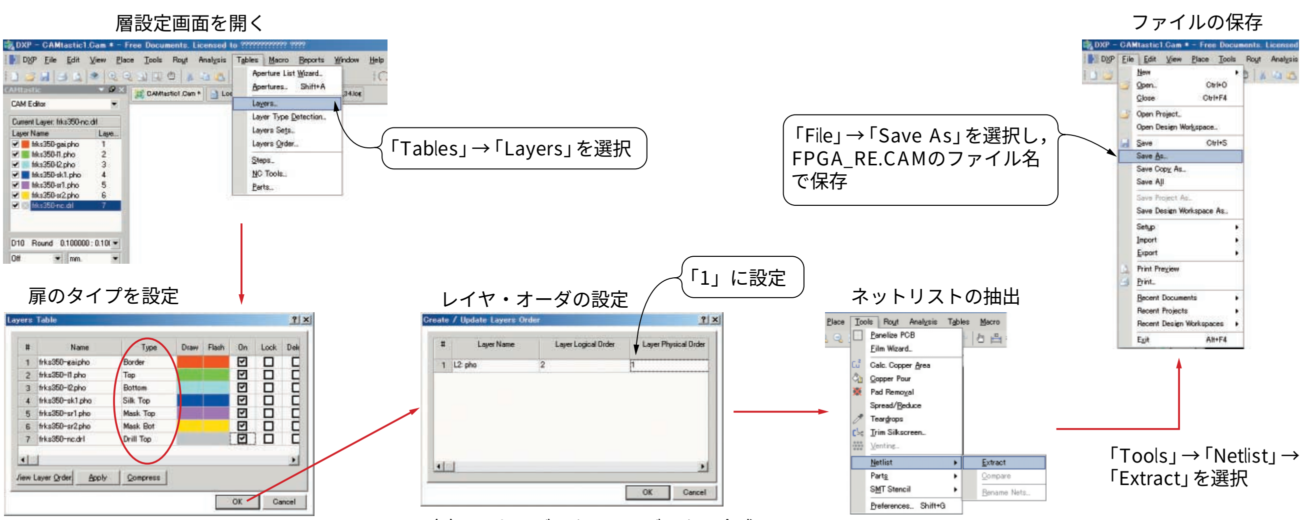
層の割り付けが終わったら，Gerberデータと NCデータを一つの基板データに変換します．これにはネットリストを抽出するためのコマンドを用います（「Tools」→「Netlist」→「Extract」を選択）．このコマンドを起動すると，まず基板データへの変換が行われ，その後，この基板データからネットリストが抽出されます．ここまでの作業が終わったら，データを保存します（FPGA_RE.CAM）．

● 回路図をトレースする

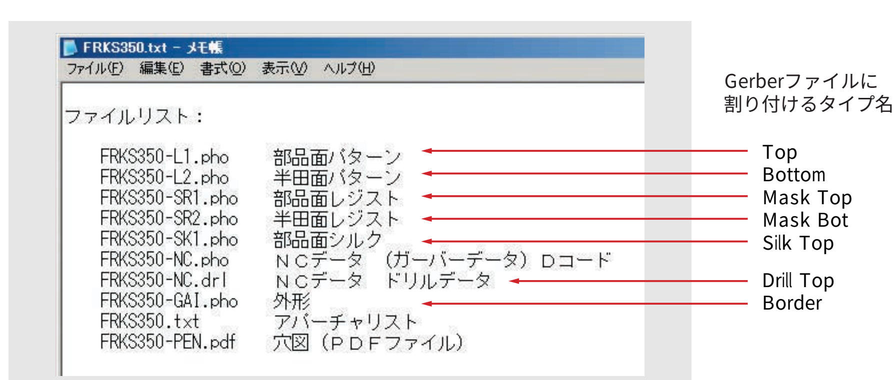
PDFフォーマットで受け取った回路図はデータを再利用できないので，回路図エディタを使って新たに描き直します．回路図は，部品シンボルを配置し，その部品の端子の間をワイヤ（電気属性を持った線）で結線します．単なるトレースなので配線は簡単ですが，部品シンボルの作成に手間取りそうです．そこで今回は，部品ライブラリの開発業者に部品シンボルの作成と回路図のトレースを一括発注することにより，手間を省きました[注11]（図11）．

回路図と基板データをリンクさせるためには，回路図シンボルにプリント基板のフットプリント（PCB部品）を割り付けなくてはなりません．このフットプリント情報はPDFで入手した回路図には含まれていないので，入手したネットリスト・データのPartsセクションを参照します．今回は入手済みのFRK-S350PADS.NET（PADSフォーマット）を参照して割り付けました．フットプリントの割り付けが終わった後，Protelフォーマットのネットリスト（FRK-S350PROTEL.NET）とこの回路図のネットを比較します．

注11：今回は，オルグシステムズ（http://www.techweb.co.jp/org_systems/）に発注した．

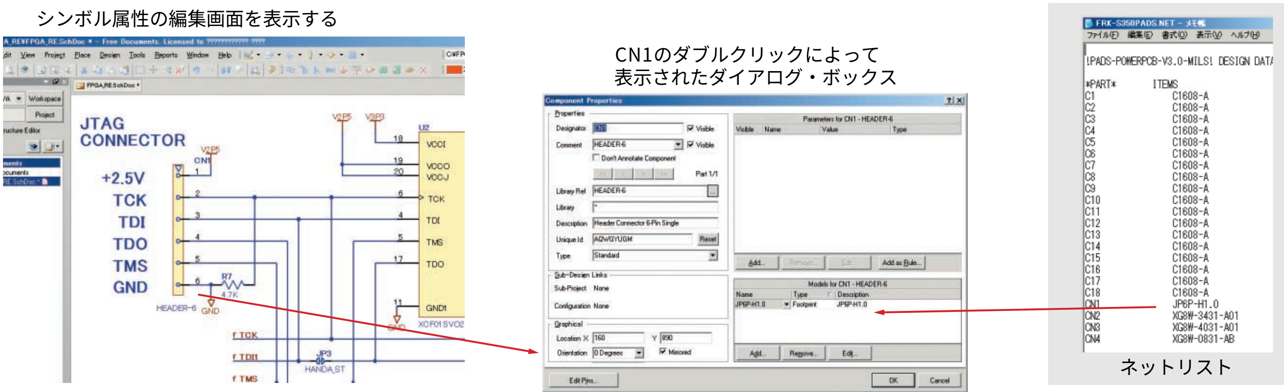


（a）Gerberデータと NCデータの合成

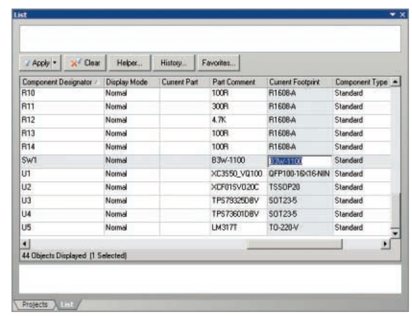


（b）CAMデータ仕様書

図10
Gerberデータと NCデータを一つの基板に合成
それぞれの Gerberデータと NCデータに層のタイプを割り付けてネットリストの抽出を行うことにより，各データが一つの基板に合成される．



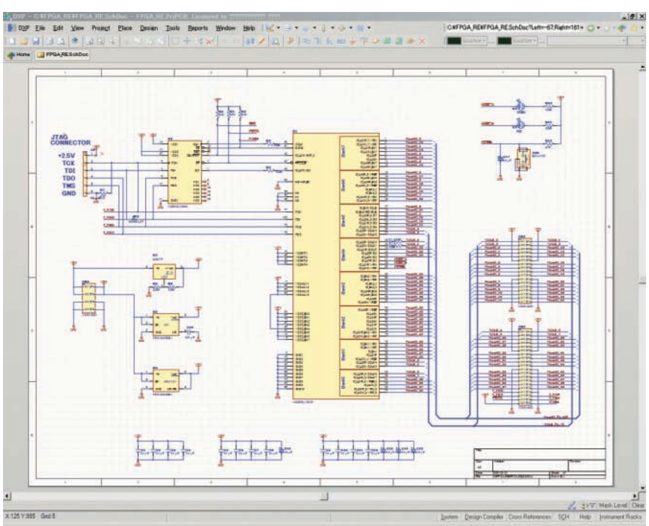
(a) ダイアログ・ボックスによるフットプリントの割り付け



(b) リスト・ウィンドウによる
フットプリントの割り付け

図12　フットプリントの割り付け

フットプリントの割り付けは，一覧表形式で行うこともできる．また，複数の部品に一括割り付けする方法もある．規模の大きな回路では，このような方法を用いて効率良く行うことが必要になる．



回路図の全体表示

図11　トレースの終わった回路図

外部にトレースを委託した．単独の回路図としては完成しているが，基板とのリンクに必要なフットプリント情報が含まれていない．

ネットが一致すれば，回路図は正しく復元されたことになります(図12)．

● 回路図データをレイアウト・エディタに読み込む

CAMレベル(製造用)の基板データをCADレベル(設計用)に変換するためには，Gerberエディタで抽出したフリー・パッドをフットプリントに変換しなくてはなりません．Gerberエディタで復元された基板データの部品は，回路図に示されているような複数の端子を持つ回路部品ではありません．一つの端子を一つのシンボルに置き換えたフリー・パッドと呼ばれる部品なので，回路図との整合がとれません．このため，これを回路図シンボルと一致するフットプリントに置き換える必要があります(図13)．

1) Gerberエディタからレイアウト・エディタへ転送

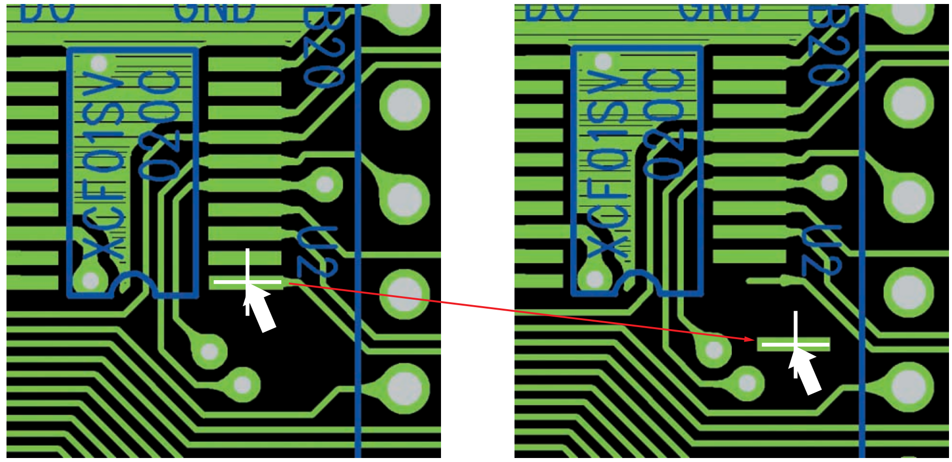
まず，Gerberエディタからコマンドを起動し，レイアウト・エディタ上にデータを送り込みます．Gerberエディタに基板が表示されている状態で，コマンド(Export to PCB)を起動します．この操作だけでレイアウト・エディタが自動的に起動し，画面上に基板データが再現されます．これでレイアウト・エディタへのデータの読み込みは完了です．この後，ネットリストを除去します．最後に画面のエラー表示を消去し，ファイル名を付けて保存します(図14，ファイル名はFPGA_RE.PcbDoc)．

2) フットプリントを作成する

ライブラリ・エディタを使用して，フットプリントを作成します．このフットプリントは，次の工程で基板データをCAMレベルからCADレベルへ変換するときに使用しま

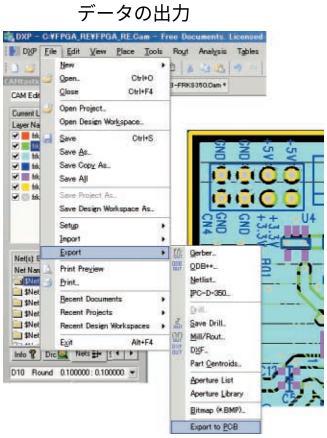
図13
Gerberエディタで合成された基板データには部品属性がない

Gerberエディタで合成された基板データは，部品端子のそれぞれが独立したフリー・パッドに変換されている．例えば，20ピンのICは20個のフリー・パッドに変換されており，一つの部品としては認識されていない．このため，回路図との整合性がとれない．また，ICを移動させようとしても，一つの端子しか移動しない．

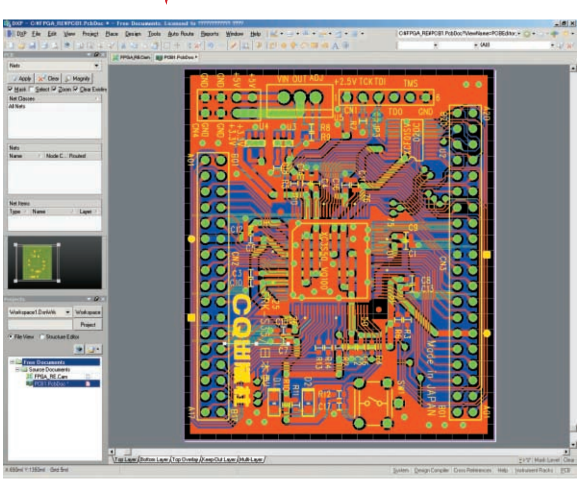


ICを移動させようとしても，端子しか動かない

データの出力

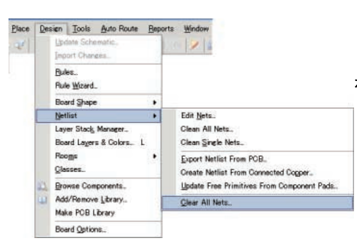


「File」→「Export」→「Export to PCB」を選び，レイアウト・エディタにデータを送る



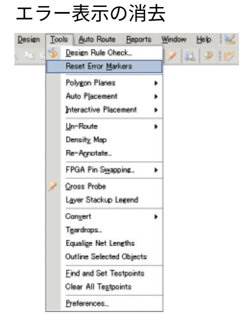
レイアウト・エディタにデータが読み込まれて基板イメージが再現される

ネットリストの除去

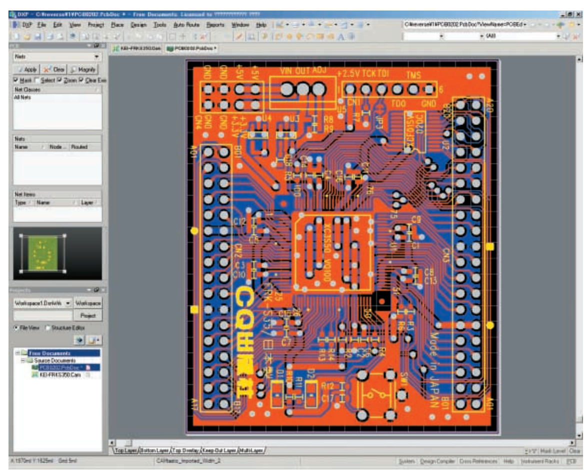


「Design」→「Netlist」→「Clear All Nets」を選び，ネットリストを除去する

エラー表示の消去



「Tools」→「Reset Error Markers」を選び，エラー表示を消す



「View」→「Fit Document」を選び，全体を表示した状態．これで，レイアウト・エディタ上での作業に必要なデータの準備が完了．「File」→「Save As」を選び，FPGA_RE.PcbDocの名まえを付けて保存する

図14　レイアウト・エディタにデータを読み込み，ネットリストを除去
レイアウト・エディタを起動した後，ネットリストを除去する．その後，エラー表示を消去して，データを保存する．

2

す．フットプリントのパターンは，基板ファイル（FPGA_RE.PcbDoc）からコピー・アンド・ペーストして作成の手間を省きます．パッド（部品の端子部分）とシルク図を配置した後，パッドにピン番号を付けます．ピン番号は回路図シンボルと一致させることが必要です．また，それぞれのフットプリントには回路図シンボルに割り付けたものと同じ名称を付けなくてはなりません．合計13個のフットプリントの作成が必要です．作成が終わったら，データを保存します（図15，ファイル名はFPGA_RE.PcbLib）．

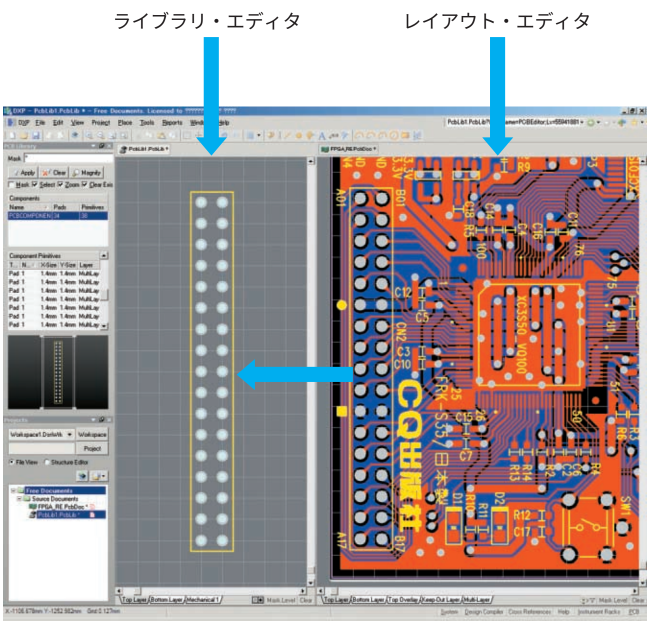


図15　フットプリントの作成

基板編集画面とライブラリ編集画面を同時に開く．コピー・アンド・ペーストにより，基板編集画面からライブラリ編集画面にパッド配列とシルクをコピーする．

3）部品の端子部分以外のフリー・パッドをビアに置換

プリント基板のレイアウトでは，異なる層間の配線パターンを接続するためのパッドをビア（VIA）と呼び，部品パッドと区別して取り扱います．しかし，Gerberエディタから読み込んだデータにはこの区別がなく，すべての箇所にパッドが使用されています．このため，部品の端子部分以外をビアに置換する必要があります．この作業は，ビア部分を選択し，パッドからビアへの変換コマンド（Convert Selected Free Pads to Vias）を起動することによって行います（図16）．

4）回路図データを読み込む

まず，複数のファイルを関連付けて取り扱うために必要なプロジェクト・ファイルを作成します．次に，回路図，回路図ライブラリ，基板データ，部品ライブラリを読み込み，作成したプロジェクトの階層の下に移動します．この後，プロジェクトに名まえを付けて保存します（ファイル名はFPGA_RE.PrjPCB）．これで，この三つのファイルが一つのプロジェクトとして認識され，相互の連携が可能となります（図17）．

この準備が終われば，回路図データを読み込みます．ま

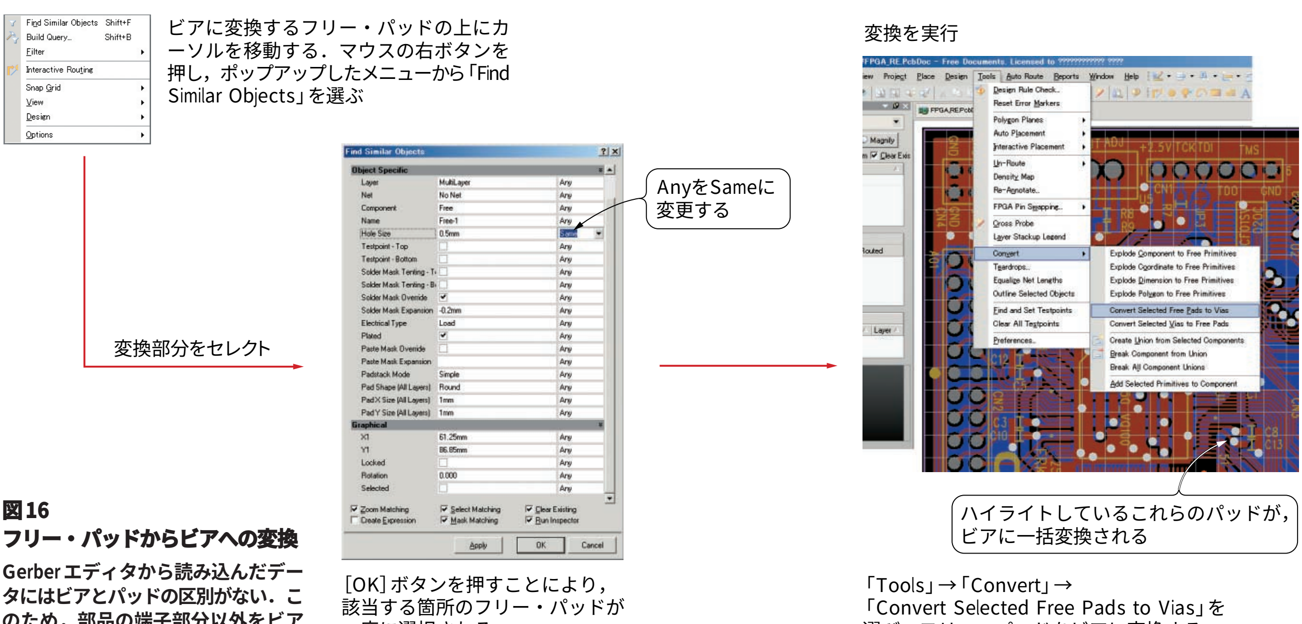


図16
フリー・パッドからビアへの変換

Gerberエディタから読み込んだデータにはビアとパッドの区別がない．このため，部品の端子部分以外をビアに置換する必要がある．

ず，基板レイアウトを開きます．そして，この画面上から回路図データの読み込みコマンド（Import Changes From FPGA_RE.ProjPCB）を起動するとネットリストとフットプリントが読み込まれ，基板レイアウトの周辺に現れます（図18）．

5）フリー・オブジェクトをフットプリントに置換する

回路図データの読み込みによって呼び出されたフットプリントを配置します．このフットプリントは基板レイアウトからコピーして作成しました．このため基板上に，フットプリントと同形状のシルクと端子配列を持つ箇所があるはずです．その箇所を見つけて，一つ一つその上に部品を重ねて置いていきます．抵抗とコンデンサは同一形状の部品が複数使用されています．このため，部品番号を見比べて該当箇所を探します．この作業では，正確な位置に配置することがとくに重要です．このため，画面を拡大して，下にある元のシルクやパッドと正確に重なることを確認したのち，部品の位置を確定します．

配置グリッドは0.025mmに設定しました．この基板は規模が小さいので問題ありませんが，このような細かいグリッドでは配置に手間がかかります．このため，大きな基板で作業を行う場合には，少なくとも0.25mm程度のグリッド値と適切な原点位置の設定が必要です．また，この配置作業では自動機能は役に立たず，手作業で行わなくてはなりません．

すべての部品の配置が終わったら，部品の下にある元のパッドとシルクを消去します．この消去作業は一括選択機能を使用することで，すばやく行うことができます．このあと，コマンド（Update Free Primitives From Component Pads）を起動して，配線パターンのネット名を更新することにより，ラッツ・ネスト[注12]が消えます．これでフリー・オブジェクトがすべて部品に置き換わり，回路図と整合する本物の基板データが復元されました（図19）．

注12：基板上の接続箇所を結ぶ直線の集まり．ネットリストを正確に反映している．個々の線を単にラッツと呼び，配線作業の際にはガイドとして使用する．ねずみの巣のように見えることからこのように呼ばれている．

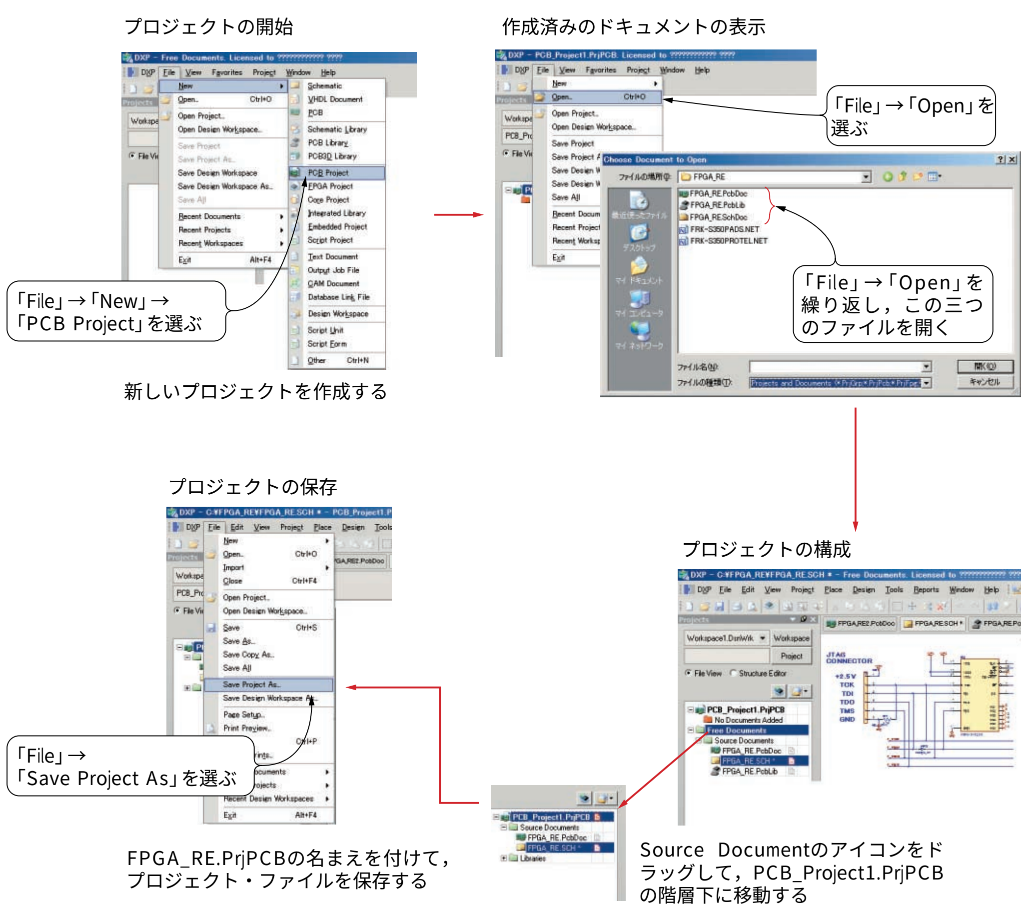


図17 プロジェクトを作成して保存する

本図のような作業により，三つのファイルが一つのプロジェクトとして認識され，相互の連携が可能になる．

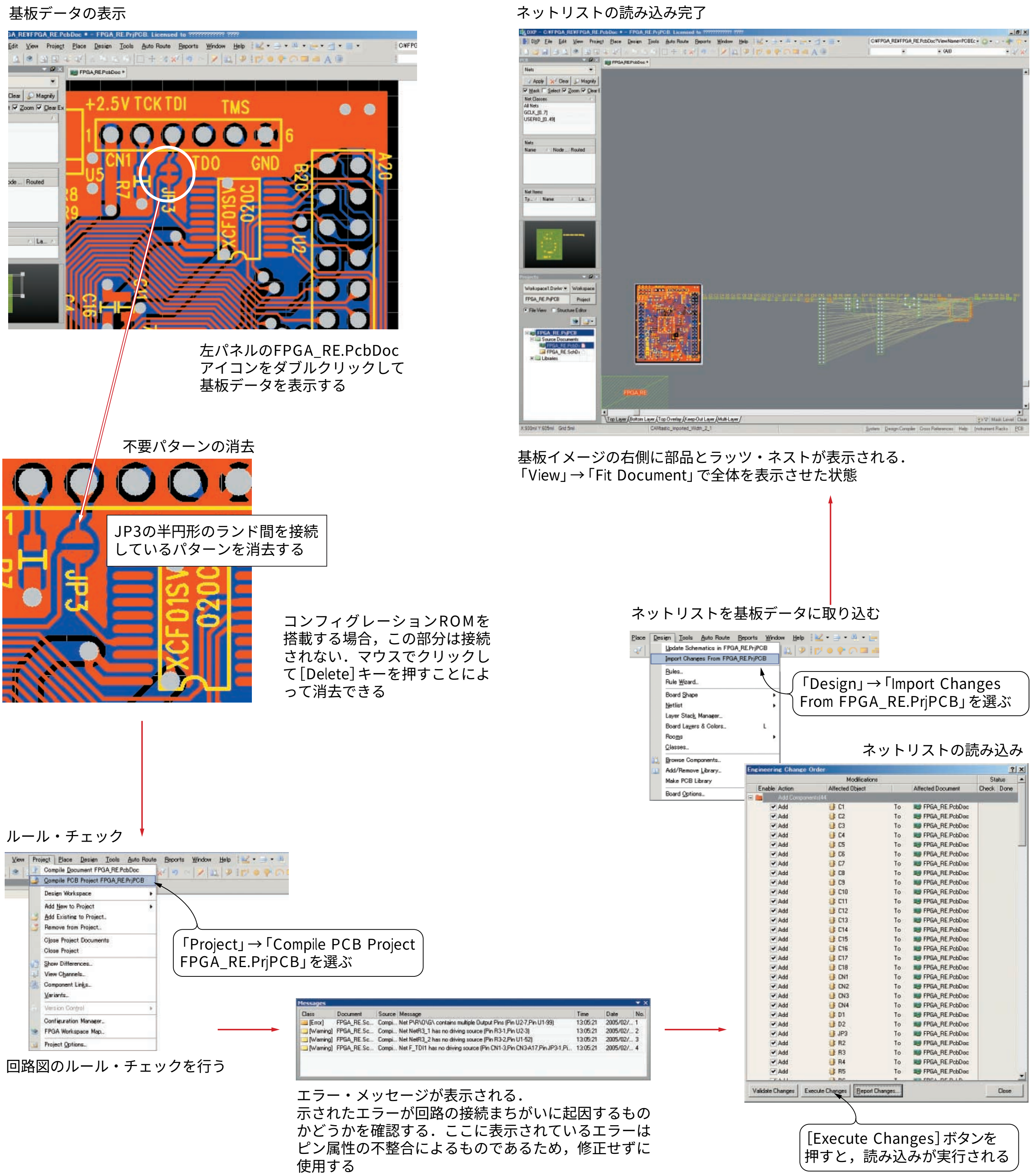


図18　ネットリストを読み込む

まず，基板レイアウトを開く．そして，この画面上から回路図データの読み込み，コマンドを起動すると，ネットリストとフットプリントが読み込まれる．

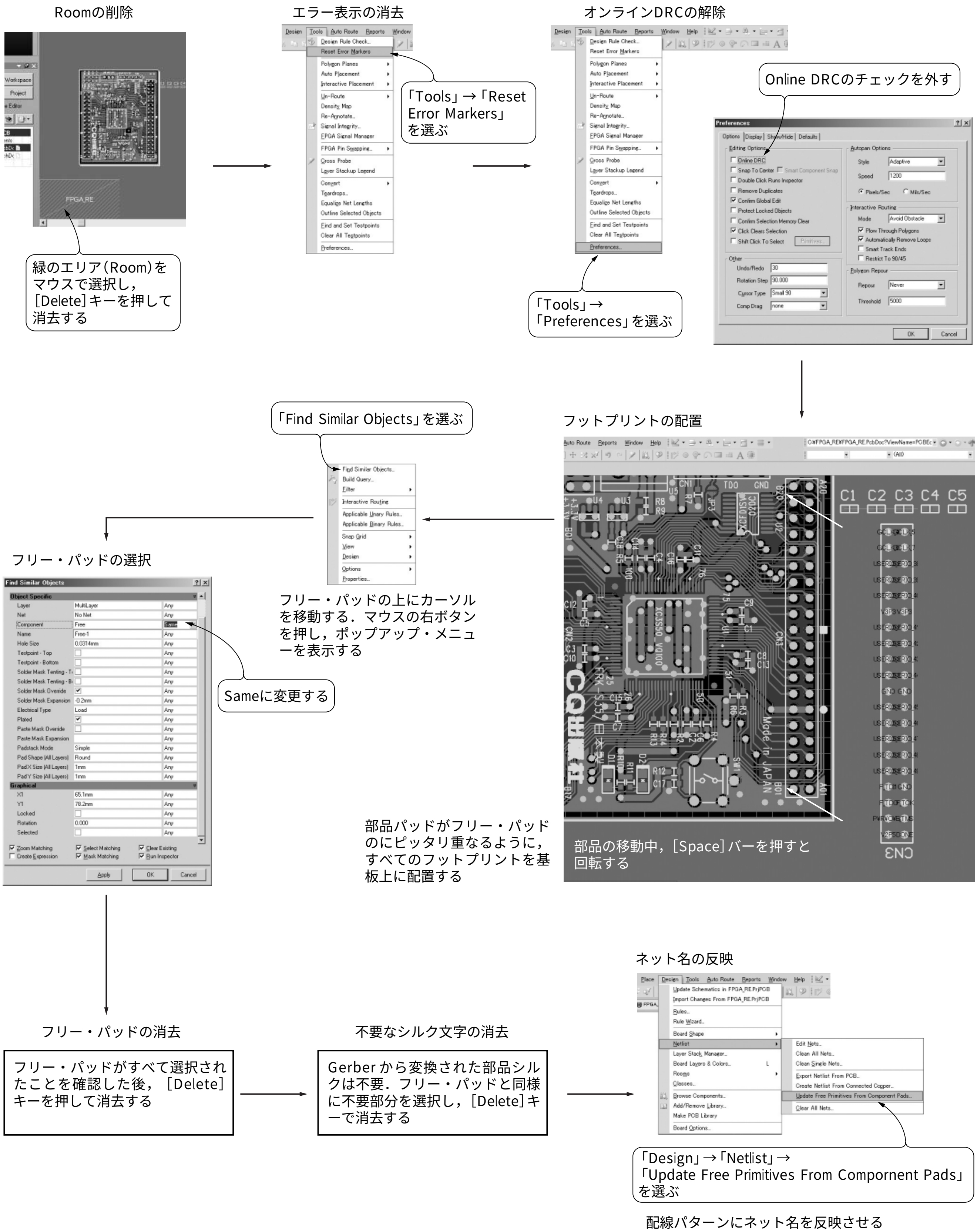


図19　フットプリントを配置する

回路図データの読み込みによって呼び出されたフットプリントを配置する．このフットプリントは基板レイアウトからコピーして作成した．このため，基板上にフットプリントと同形状のシルクと端子配列を持つ箇所があるはずである．その箇所を見つけて，一つ一つその上に部品を重ねて置いていく．

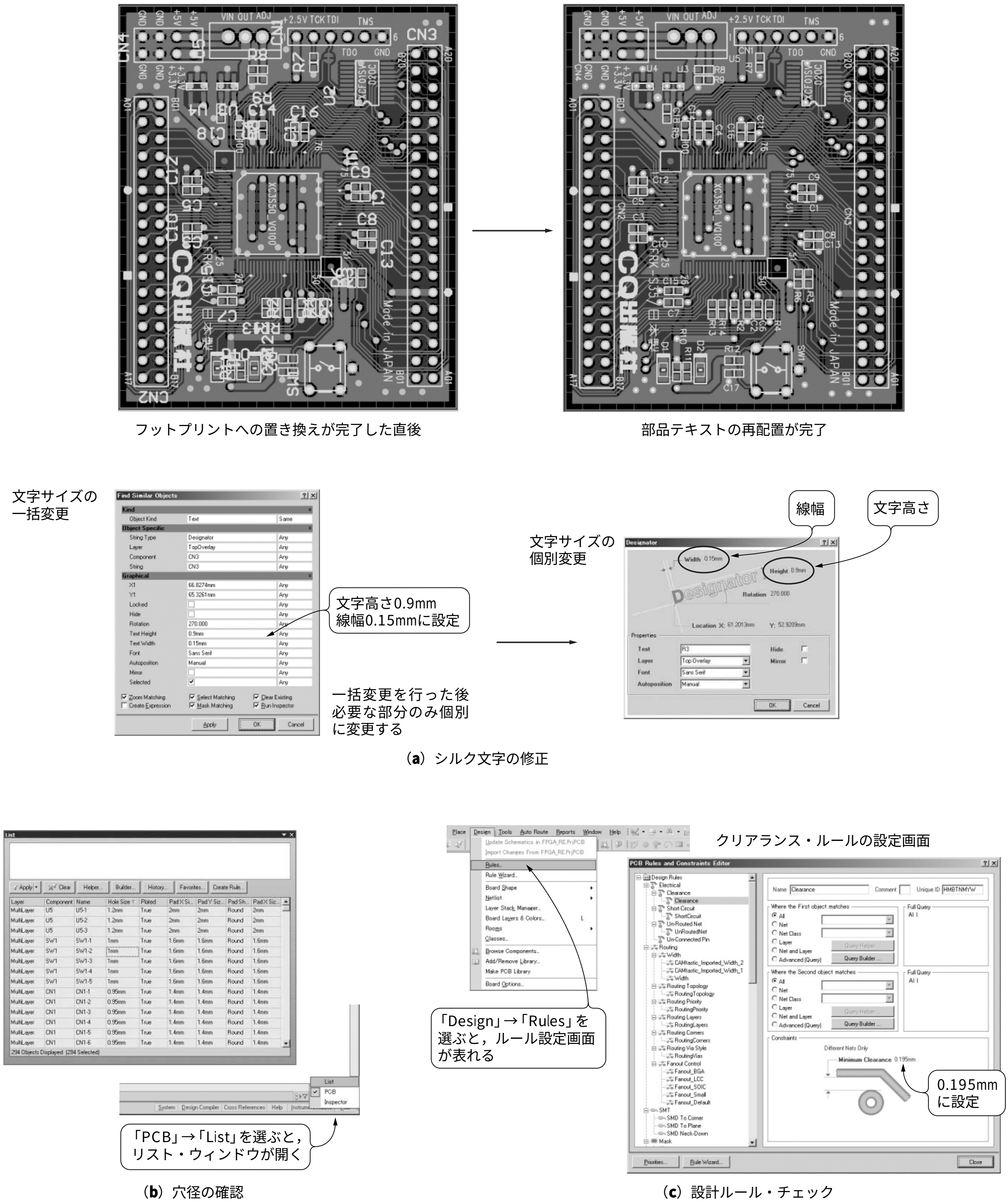


図20　基板のしあげ

「Find Similar Objects」によって変更箇所を選択した後，オブジェクト・インスペクタでサイズを設定する．また，基板上の文字をダブルクリックすると，(a)のようにダイアログ・ボックスが表示される．これを使って，文字のサイズを個別に調整できる．文字サイズを変更した後，マウスで文字を一つ一つ動かす．移動中，[Space]バーを押すと，文字が回転する．リスト・ウィンドウでは，(b)のように選択されているパッドのプロパティが一覧表示される．穴径を確認し，誤りがあれば修正する．設計ルール・チェックでは，(c)のようにクリアランス・ルールの設定値だけを変更する．設定が終われば，「Tools」→「Design Rule Check」を実行する．

● プリント基板をしあげる

プリント基板の回路図データは復元されましたが，シルク文字がバラバラに散らばっているので，この位置を修正しなくてはなりません．また，パッド・サイズや穴径に誤りがないかどうかをチェックすることも必要です．

まず，シルクの修正です．部品番号以外のシルク文字や絵がらはGerberデータから変換したものです．これらはそのまま使用し，動かす必要はありません．部品番号だけを移動します．文字が大きすぎるので，作業の前に小さなサイズに変更します．部品番号の移動は，基板の現物を見ながら行うと作業がはかどります．現物がなければ，最初に使ったシルク層のGerberデータをプリント・アウトしてから作業するとよいでしょう．

次に，パッド・サイズと穴径をチェックします．パッドの属性を一覧表示すれば，サイズと穴径を容易に確認できます．

最後に設計ルール・チェックを行います．これをパスすれば，基板の復元は完了です（**図20**）．

3 復元した基板データを再利用する

ここまでの作業で完全な基板データが復元されました．このデータからGerberデータとNCデータを出力すれば，本誌2005年1月号に付属した基板と同じ基板を作ることができます．しかし，同じものを作るだけなら元のGerberデータとNCデータだけで十分なので，基板データを復元する意味はほとんどありません．ここでは復元された基板データを調べて，有効に再利用することを考えます．

● 復元された基板レイアウトを調べる

本誌に付属した基板は，一見するとありふれたプリント基板のように見えます．しかし，よく見ると配線にむだがないうえ，製造面に対する考慮が行われた完成度の高い基板であることがわかります．再利用する際には復元されたデータに含まれている設計者のノウハウを吸収することが重要です．本基板から筆者が読み取ったことを述べます．

1）手はんだに対する考慮が行われている

手はんだを行うパッド部分は，熱と力によるストレスでパターンが破損しにくいように，ティアドロップ[注13]で補強されています（**図21**）．

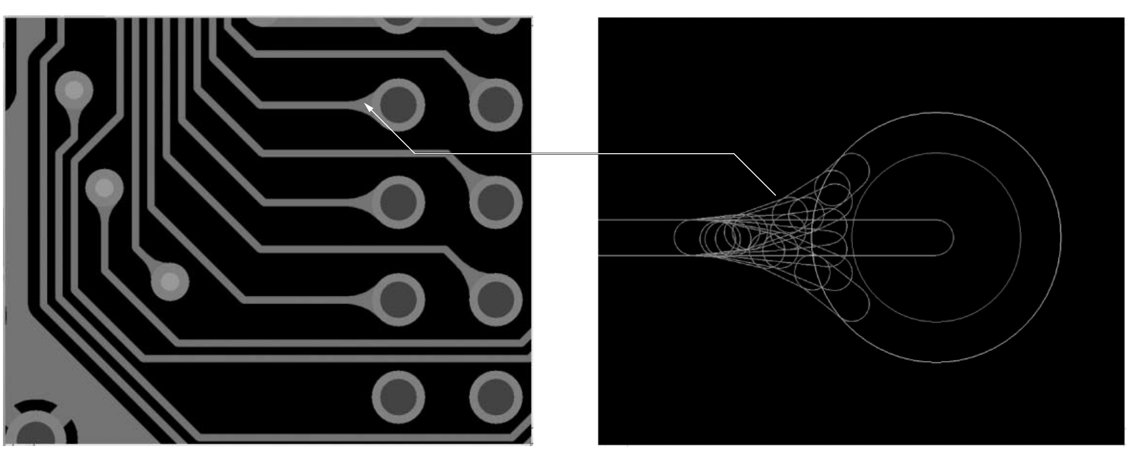
2）配置と配線の完成度が高い

適正な部品配置が行われており，配線パターンの引き回しにむだがありません．また高密度なレイアウトであるにもかかわらず，広いベタ・エリアが確保されています．このことから，設計に慣れた人が自動配線を使用せず，ていねいに手配線したものであることがわかります．

3）基板を製造しやすいように，配線ルールを選択

密度の高い基板ですが，製造しやすいピン間2本の設計

注13：パッドと配線パターンの接続部を補強するための縁取り．片面基板の場合には多用されるが，両面基板や多層基板ではストレスのかかる部分でのみ使用される．また，小径ビアの部分に用いられることもある．サブランドと呼ばれる小さな円で代用される場合もある．涙のような形をしているため，このように呼ばれている．



（a）パッドとビアに施されたティアドロップ　（b）拡大図

図21　ティアドロップ

すべてのパッドとビアの配線引き出し部がティアドロップで補強されている．（b）のように拡大すると，複数の直線の組み合わせにより，スムーズな曲線が形成されていることがわかる．

ルールで配線されています(0.2mmの線幅と間隔が確保されている)．より精密なピン間3本(0.158mmの線幅と間隔)のルールを用いると設計は楽になりますが，基板の製造が難しくなります．少しでも品質の良いものを安く手に入れたい，という設計者の意図が感じられます．

● プリント基板の構造と素性を調べる

復元した基板データを有効に再利用するためには，基板の素性を把握することが必要です．完全なCADデータに復元されているため，レポート出力や設計ルール・チェックが可能です．これによって基板の構造を詳細に把握できます．さらに伝送線路シミュレーションによって配線パターンの素性を調べることができます．そこで，高速回路では配慮が欠かせない配線長と配線の特性インピーダンスの値を調べてみました(**図22**)．

● 別の回路と合成する

復元した基板データは，通常の手法で設計した場合と同じように変更や追加，さらにはほかの基板データと合成することが可能です．そこで，本誌2005年1月号の第6章で解説されている汎用評価ボードと付属FPGA基板を合体させる手順を簡単に説明します．動作検証の際には2枚の基板で動かし，実際の生産時に1枚の基板にまとめたいといった場合によく利用する方法です．

1）汎用評価ボードの基板データを復元する

付属FPGA基板のデータはすでに復元が終わっているので，汎用評価ボードのみ復元します．必要なデータは本誌2005年1月号に付属するCD-ROMに収められています．復元の手順はFPGA基板の場合と同じです[注14]．

2）復元の終わった両方の基板データを画面に読み込む

両方の基板データが別々の画面に表示されている状態で，汎用評価ボードの編集画面にFPGA基板をコピー・アンド・ペーストで貼り付けます．

3）双方の基板のネット名を一致させる

二つの基板はコネクタによって接続されます．このコネクタのパッドに与えられているネット名を同じ名まえに変更します．今回は，汎用評価ボードのネット名を変更することによって一致させました．この変更が終わると，双方の基板の接続箇所を示すラッツ・ネストが現れます(**図23**)．

4）双方の基板のコネクタを削除する

1枚の基板に合成するとコネクタが不要になるので，削除します．

5）汎用評価ボードの配線を修正してスペースを空ける

汎用評価ボードの配線パターンを修正し，FPGA基板を組み込むためのスペースを確保します．いうまでもなく，もともとFPGA基板との接続用コネクタが配置されていた部分の内側が最適です．

6）FPGA基板のデータを汎用評価ボード上に移動する

汎用評価ボードの中に空けたスペースに，FPGA基板のパターンを丸ごと移動します．

7）FPGA基板部を配線でつなぐ

汎用評価ボード上の回路とFPGA基板部分の回路を配線パターンでつなぎます．

● リバース・エンジニアリングの効果は？

リバース・エンジニアリングの手法を用いて無事に基板データを復元することができました．慣れない裏ワザ的な作業が多かったためか，予想以上に煩雑な作業になりました．しかし，新規に基板を設計する場合と比較して，作業時間は明らかに削減できました．作業時間についての筆者の印象を以下に挙げます．

- しあげ作業は，部品番号の修正以外の作業が不必要になった(作業時間は半減)
- 配線とベタ塗りは，読み込んだGerberデータをそのまま使用した(作業時間はゼロに)

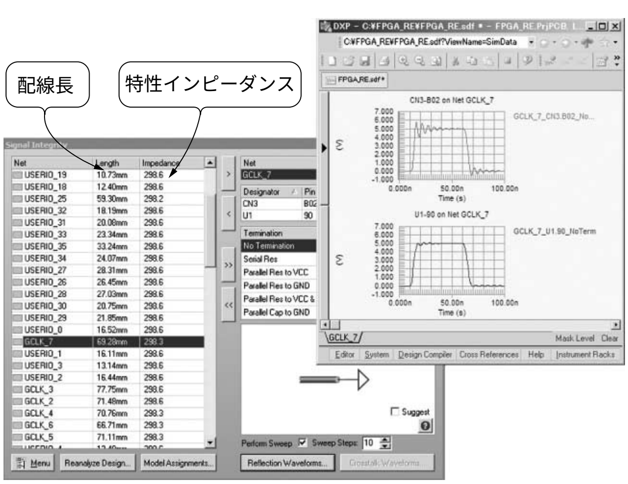


図22　伝送線路シミュレーション
特性インピーダンスと信号の劣化を確認できる．

注14：この基板では，Gerberから復元したGNDベタのデータ量が多いため処理に時間がかかった．処理時間を短縮するにはCADツールの機能を使用してこのGNDベタを再配置する必要がある．

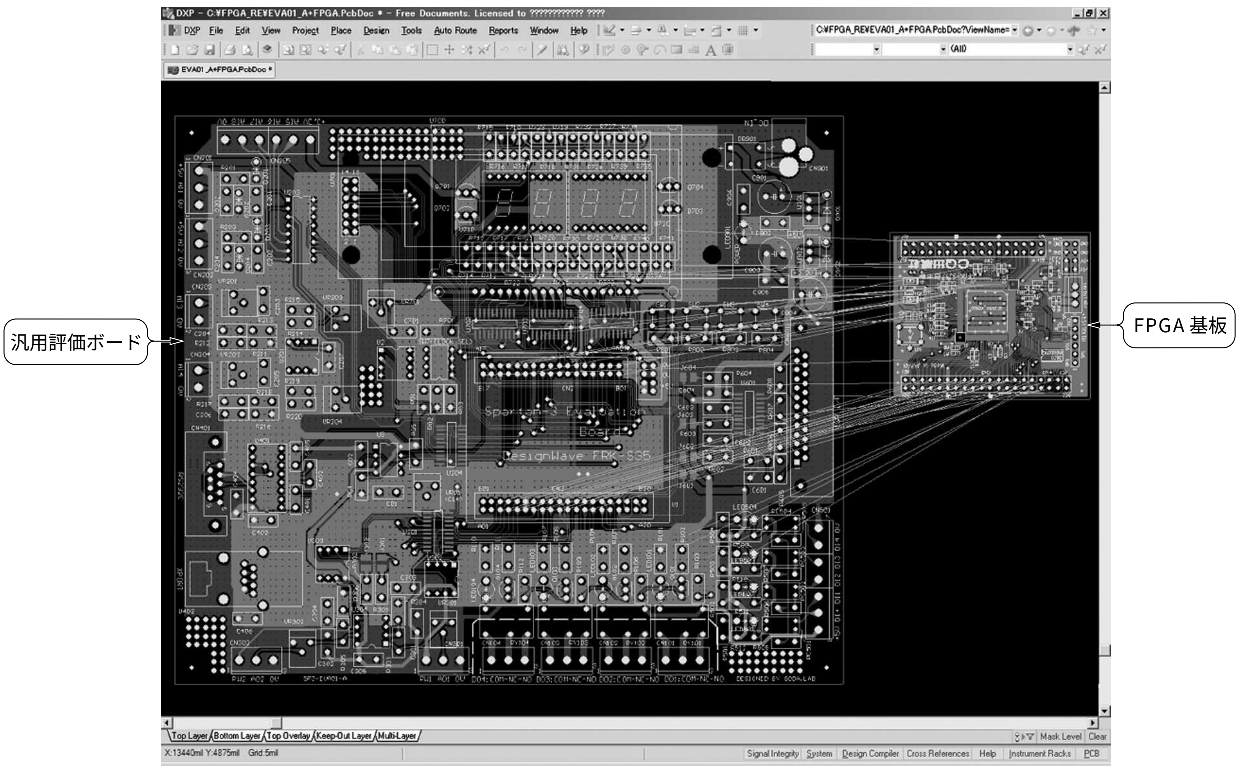


図23　汎用評価ボードとFPGA基板を合体
両方の基板データを一つの編集画面に読み込み，ネット名を一致させた段階．

- 部品配置は，Gerberデータがテンプレートとして使えた．しかし，精密な位置合わせが必要になった（作業時間は変わらず）．
- フットプリントの作成は，コピー・アンド・ペーストによって，Gerberデータのフットプリント・パターンをそのまま再利用できた（作業時間は半減）．

一方，新規の設計では不要な次のような作業が新たに発生しました．

- Gerberデータと NC データを読み込んで再現する
- 各層の Gerber データに属性を与えて，一つの基板データに合成する
- 合成された基板データからビアを分離する

これらは手作業による編集ではなく，コマンド操作によってほぼ自動的に処理されます．しかし，ふだんほとんど使用しないGerberエディタやレイアウト・エディタの特殊なコマンドを使用したので，操作に手間取りました．もっともこれは慣れの問題なので，次回からは手間取らないはずです．

リバース・エンジニアリングは小手先の技術だけでは成果があがりません．データの復元を行う際に，通常の設計を行う場合よりも高度なCADツールの使いこなしが必要になります．さらに，効率良くデータを復元するためには，フットプリントだけでなく，回路図シンボルを含めたライブラリの整備が必要になります．また，復元された基板データの分析や再利用を行うためには，新規に設計する場合と同等の知識や設計スキルが必要になります．

しかし，これらの条件を一度に整えることはできません．できるところから始めて，これらを徐々に蓄積していけばよいと思います．

じょうの・ゆきお
アンビル コンサルティング（株）
info@anvil.co.jp

<筆者プロフィール>
城野幸男．長年にわたり，Windows PCB-CADツールの販売に従事．2003年4月にPCB-CADツールの導入と運用を支援するコンサルティング・オフィス「アンビル コンサルティング」を設立．